



Melhoria da segurança nas cidades através do uso de estações GNSS para o monitoramento do vapor de água precipitável com o método PPP

Luiz Filipe Campos do Canto

Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas-UNESP, Brasil.
luiz.canto@unesp.br

Paulo de Oliveira Camargo

Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas-UNESP, Brasil.
paulo.camargo@unesp.br

João Francisco Galera Monico

Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas-UNESP, Brasil.
galera.monico@unesp.br

RESUMO

Cidades sustentáveis são ambientes urbanos projetados e desenvolvidos para promover o bem-estar econômico, social e ambiental. O monitoramento do clima desempenha um papel vital na obtenção de cidades sustentáveis, fornecendo dados e insights essenciais para o planejamento eficaz, a tomada de decisões e a implementação de estratégias. As inundações apresentam um fator recorrente para as áreas urbanas, necessitando de medidas para a realização do monitoramento. O vapor de água precipitável (PWV) é um componente com alta variabilidade, sendo um parâmetro para entender a disponibilidade de umidade e sua relação com a precipitação. Diferentes técnicas foram desenvolvidas para estimar e monitorar o vapor de água. Atualmente, têm-se destacado os sistemas Global Navigation Satellite System (GNSS) na estimativa do PWV, devido à alta precisão e resoluções, do seu custo e possibilidade de monitoramento. Neste trabalho, foi utilizado o método Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) em tempo quase real, através dos atrasos troposféricos de cinco estações da rede GNSS brasileira, localizado nas diferentes regiões, em cidades que são frequentemente afetadas por fortes chuvas, para os cálculos dos PWVs, para comprovar a eficiência do uso do GNSS. Os dados PPP pós-processado do IBGE foram utilizados como referência para avaliação dos resultados e posteriormente a análise da precisão. Os resultados mostram-se satisfatórios para o propósito e se consolida como uma ferramenta fundamental para que ambientes urbanos realizem o monitoramento em tempo quase real de eventos climáticos.

PALAVRAS-CHAVE: Cidades sustentáveis. GNSS método PPP. Vapor de Água Precipitável.

1 INTRODUÇÃO

Cidades e comunidades sustentáveis são áreas urbanas projetadas e desenvolvidas com foco na sustentabilidade econômica, social e ambiental. Priorizam o bem-estar e a qualidade de vida dos moradores, além de minimizar o consumo de recursos e os impactos ambientais. Essas cidades adotam soluções e práticas inovadoras em áreas como energia, transporte, gestão de resíduos, planejamento urbano e engajamento da comunidade para atingir seus objetivos, com a prioridade do bem-estar das gerações presentes e futuras, abordando os desafios sociais, econômicos e ambientais (LACONTE e GOSSOP, 2016). Essas cidades se esforçam para alcançar um equilíbrio harmonioso entre o desenvolvimento urbano e a preservação dos recursos naturais, ao mesmo tempo, em que promovem a equidade social e o crescimento econômico. A colaboração e parcerias entre várias partes interessadas, incluindo autoridades governamentais, empresas, organizações comunitárias e cidadãos, são essenciais para a construção de cidades e comunidades sustentáveis. Essas parcerias facilitam o compartilhamento de conhecimento, a mobilização de recursos e a implementação de políticas e iniciativas eficazes. (GIRARDET, 1999; COHEN e GUO, 2021).

Dentre os elementos-chave do desenvolvimento sustentável, pode-se destacar estratégias de planejamento urbano que promovem o desenvolvimento compacto e de uso misto, reduzindo a necessidade de longos deslocamentos e permitindo o uso eficiente do solo. Priorizam a preservação dos espaços verdes, da biodiversidade e dos habitats naturais, promovendo uma convivência harmoniosa entre as áreas urbanas e o meio ambiente. A promoção a inclusão, a coesão social e a participação da comunidade, com a prioridade da habitação acessível, acesso à educação, saúde e amenidades culturais para todos os residentes, envolvendo os cidadãos nos processos de tomada de decisão, incentivando o envolvimento ativo e capacitando as comunidades para moldar seu ambiente urbano, com igualdade social,

garantindo acesso igualitário a serviços essenciais, educação e saúde para todos os residentes, promovendo a diversidade, a inclusão e a coesão social, fomentando o sentimento de pertença e responsabilidade coletiva. A visão de cidades e comunidades sustentáveis representa um caminho para um futuro mais próspero, equitativo e ambientalmente saudável. Ao adotar práticas sustentáveis, as cidades podem se tornar espaços vibrantes, resilientes e habitáveis (LACONTE e GOSSOP, 2016; COHEN e GUO, 2021).

Uma inundação refere-se a um transbordamento ou acúmulo de água em terras que são tipicamente secas. Ocorre quando o volume de água excede a capacidade do solo ou dos sistemas de drenagem para absorvê-la ou contê-la. As inundações podem ser causadas por vários fatores, incluindo chuvas fortes, degelo, falha de barragens, tempestades ou uma combinação desses fatores. Eles podem ocorrer tanto em ambientes naturais quanto urbanos e podem variar em escala, desde inundações repentinas localizadas até inundações ribeirinhas ou costeiras em grande escala. As inundações causam estragos na infraestrutura urbana, levando a graves danos e perturbações, tendo impactos significativos nas áreas afetadas, como nas estradas, pontes e sistemas de transporte público, tornam-se intransitáveis ou mesmo destruídos, impedindo a mobilidade e os esforços de resposta a emergências (GIRARDET, 1999; TUCCI, 2003).

Uma das consequências mais graves das inundações é a ameaça à segurança e à saúde humana, da maneira que instalações essenciais como hospitais, por exemplo, podem sofrer danos, impactando os serviços essenciais. As enchentes que aumentam rapidamente representam um risco de afogamento, principalmente para aqueles que são pegos desprevenidos ou incapazes de escapar. A força da água também pode causar colapsos estruturais, levando a ferimentos e mortes. Além disso, as águas das enchentes ficam contaminadas com poluentes, esgoto e produtos químicos, apresentando riscos à saúde, como doenças transmitidas pela água, doenças respiratórias e infecções de pele. O deslocamento das populações afetadas para abrigos temporários ou centros de evacuação superlotados aumenta ainda mais a vulnerabilidade e doenças. Além disso, as redes elétricas e de comunicação são frequentemente comprometidas, dificultando as operações de resgate e recuperação. Gerenciar e mitigar os riscos associados às inundações é essencial para proteger vidas e propriedades, devendo priorizar medidas proativas para mitigar os riscos de inundação. Isso inclui planejamento urbano robusto, sistemas de drenagem aprimorados, preservação de várzeas naturais e campanhas de conscientização pública, bem como garantir a resiliência das comunidades e infraestrutura em áreas propensas a inundações (CASTRO, 2003; SANTOS, 2007).

Embora fatores naturais, como fortes chuvas e rios transbordando, tenham historicamente causado inundações nas cidades, o papel das atividades humanas em exacerbar esse problema não pode ser negligenciado. Causas antropogênicas, como urbanização, infraestrutura inadequada, desmatamento e mudanças climáticas, contribuíram significativamente para o aumento da frequência e gravidade dos eventos de inundação em áreas urbanas. O rápido crescimento das cidades e a expansão urbana levaram à substituição de paisagens naturais por superfícies impermeáveis como concreto e asfalto. Essas superfícies impedem que a água se infiltre no solo, levando ao aumento do escoamento durante os eventos

de chuva. O volume excessivo de escoamento superficial sobrecarrega os sistemas de drenagem, causando inundações urbanas. Além disso, a expansão de áreas impermeáveis reduz a disponibilidade de espaços naturais de armazenamento e retenção de água, agravando os riscos de inundação (TINGSANCHALI, 2017; LI e CHENG, 2018).

De acordo com Johansen (2017) e Tingsanchali (2017), a mudança climática antropogênica está alterando os padrões climáticos globais, resultando em chuvas mais frequentes e intensas em certas regiões. Temperaturas mais quentes aumentam a quantidade de umidade na atmosfera, levando a fortes chuvas e aumentando os riscos de inundações. O efeito ilha de calor urbano, causado pela concentração de concreto e asfalto nas cidades, agrava esses efeitos. O aumento do nível do mar devido às mudanças climáticas também aumenta o risco de inundações costeiras, principalmente nas cidades baixas e devido ao desenvolvimento urbano não planejado, em áreas vulneráveis. A construção nessas áreas interrompe as zonas naturais de absorção de inundações, deslocando a água para as áreas circundantes e aumentando o risco de inundações. A invasão das planícies de inundação reduz sua capacidade de absorver o excesso de água durante os eventos de inundação, deixando as cidades mais suscetíveis a inundações.

Conforme Guerra e Vitte (2004), o Brasil, um país conhecido por suas diversas paisagens e abundantes recursos hídricos, onde enfrenta desafios significativos quando se trata de inundações em suas cidades. Com uma combinação de fatores naturais e atividades humanas, as inundações tornaram-se um problema recorrente, causando danos substanciais às áreas urbanas e oferecendo riscos à população. O território brasileiro abrange diversas zonas climáticas, desde florestas tropicais até regiões semiáridas. Algumas áreas sofrem fortes chuvas, particularmente durante as estações chuvosas, levando a um aumento dos riscos de inundação. Regiões como a floresta amazônica, o Pantanal e as cidades costeiras são particularmente propensas a inundações devido às suas características geográficas únicas e à proximidade de corpos d'água. A rápida urbanização no Brasil levou à expansão das cidades e à construção de infraestrutura, muitas vezes sem consideração suficiente para os riscos de inundação. Sistemas de drenagem inadequados, especialmente em áreas urbanas mais antigas, são mal equipados para lidar com chuvas intensas, resultando em acúmulo de água em ruas, casas e espaços públicos. Redes de drenagem sobrecarregadas levam a inundações urbanas, interrompendo a vida cotidiana, danificando propriedades e apresentando riscos à saúde.

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o Brasil, assim como outros países, vive os impactos das mudanças climáticas, que agravam os riscos de inundações. As mudanças nos padrões de chuva, o aumento da intensidade dos eventos de chuva e o aumento do nível do mar representam desafios para as cidades, principalmente ao longo da área costeira. O aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos aumenta ainda mais a vulnerabilidade das áreas urbanas às inundações, exigindo medidas de adaptação e estratégias de mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o país enfrenta disparidades socioeconômicas significativas e muitas comunidades de baixa renda são afetadas por enchentes. Os assentamentos informais, muitas vezes localizados em áreas vulneráveis, como várzeas e encostas, carecem de infraestrutura adequada e são mais suscetíveis a inundações. Os moradores dessas áreas

enfrentam riscos crescentes para sua segurança, saúde e estabilidade econômica durante eventos de inundação, destacando a necessidade de planejamento urbano inclusivo e resiliente.

O monitoramento das chuvas em áreas urbanas é de extrema importância para mitigar os riscos associados a precipitações intensas, aprimorar as estratégias de gerenciamento de enchentes e promover o desenvolvimento urbano sustentável. Uma das principais razões para monitorar a precipitação em áreas urbanas é melhorar as estratégias de gerenciamento de enchentes. A urbanização muitas vezes leva à substituição de superfícies permeáveis por impermeáveis, reduzindo a absorção natural da água da chuva. Conseqüentemente, eventos de chuvas intensas podem resultar em escoamento rápido e inundações repentinas. Ao monitorar as chuvas em tempo real, as autoridades podem alertar prontamente os moradores e implementar planos de resposta a emergências para mitigar o impacto das enchentes, salvando vidas e minimizando os danos à propriedade. Ao analisar os dados históricos, pesquisadores e planejadores urbanos podem identificar padrões e estabelecer tendências de longo prazo, permitindo a tomada de decisões informadas sobre o desenvolvimento de infraestrutura, gerenciamento de águas pluviais e preparação para enchentes (WONG e CHEN, 2019).

No Brasil, o monitoramento das chuvas é conduzido principalmente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O INPE é responsável pelo monitoramento de chuvas e condições climáticas em todo o Brasil por meio de tecnologias de sensoriamento remoto por satélites. O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do INPE (CPTEC) opera estações de monitoramento meteorológico e sistemas de satélites que fornecem dados valiosos sobre padrões de chuva e outras variáveis meteorológicas. A ANA é responsável pela gestão dos recursos hídricos no Brasil, incluindo o monitoramento das chuvas e dos níveis dos rios, operando uma rede de estações de monitoramento da precipitação em todo o país, recolhendo dados sobre a precipitação. O INMET é a instituição responsável por fornecer informações e monitorar as condições climáticas no Brasil, dispondo de uma rede de estações pluviométricas, que são equipamentos responsáveis por medir e registrar a quantidade de chuva em diferentes regiões do país, bem como o uso de radares meteorológicos e satélites. Além disso, vários órgãos regionais, estaduais e instituições acadêmicas, também desempenham um papel no monitoramento das chuvas no Brasil.

A precipitação é um fenômeno meteorológico complexo influenciado por vários fatores atmosféricos. O Vapor de Água Precipitado (Precipitable Water Vapor - PWV), que representa a quantidade total de vapor de água em uma coluna vertical da atmosfera, tem se mostrado promissor como um parâmetro chave para entender a disponibilidade de umidade e sua relação com a precipitação, fornecendo informações valiosas sobre a disponibilidade de umidade e facilitar a estimativa e previsão de chuvas. O PWV desempenha um papel vital no ciclo da água, com influência direta na formação e intensidade das chuvas. Valores mais altos de PWV indicam maior teor de umidade na atmosfera, sugerindo um maior potencial de precipitação. Correlações entre PWV e precipitação foram observadas, com estudos demonstrando que mudanças na PWV podem preceder eventos de chuva. Ao monitorar e analisar o PWV é possível obter informações sobre as condições de umidade atmosférica e

melhorar as previsões de chuva (ZIV e REUVENI, 2022; KELSEY, RILEY e MINSCHWANER, 2022; REN et al., 2023).

Conforme Leick, Rapoport e Tatarnikov (2015), diferentes técnicas são capazes de realizar o monitoramento do PWV, com destaque as radiossondas, radiômetros de vapor d'água, fotômetros solares. No entanto, as técnicas citadas não garantem a necessidade atual do monitoramento em tempo real. Uma tecnologia promissora e em expansão, com instrumentos e instalação de baixo custo, capaz de obter PWV com alta precisão e resoluções espaciais e temporal em quase tempo real, é através do sistema de navegação por satélite (Global Navigation Satellite System – GNSS). O GNSS refere-se a uma constelação de satélites no espaço, trabalhando em conjunto com receptores e sistemas terrestres, para fornecer posicionamento preciso e dados de navegação, por meio de sinais no espaço, para que receptores GNSS sejam capazes de calcular posição, velocidade e tempo. Os principais sistemas GNSS em operação hoje incluem o Sistema de Posicionamento Global (GPS) mantido pelos Estados Unidos, o Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) desenvolvido pela Rússia, o Galileo através da União Européia e o BeiDou pela China. Os principais métodos de posicionamento via receptores GNSS são o posicionamento absoluto e posicionamento relativo (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é realizado de modo absoluto, e envolve apenas o uso de um receptor. O método realiza a modelagem dos erros através da combinação das observações com órbitas/relógios dos satélites, geradas a partir de uma rede de estações de referência global e enviadas através do satélite ou internet. Seu nível de precisão posicional é alto e o processamento pode ser realizado em tempo quase real ou no modo pós-processado (MONICO, 2008; MARQUES, 2012). Para detalhes sobre o sistema, consultar Monico (2008), Marques (2012) e Langley, Teunissen e Montenbruck (2017). Nos últimos anos, pesquisas demonstram o potencial do PPP para estimar o PWV, explorando os atrasos nos sinais GNSS causados pela umidade atmosférica, em termos de precisão, resolução temporal e custo-benefício, tornando-o uma abordagem promissora para estimativa de PWV em vários estudos meteorológicos e atmosféricos.

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) compreende estações GNSS posicionadas em todo o Brasil, oferecendo ampla cobertura e permitindo que os usuários acessem informações precisas de posicionamento, que proporcionam, uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas. Essas estações são equipadas com receptores e antenas GNSS de última geração, garantindo coleta de dados de alta qualidade, oferecendo suporte a levantamento, mapeamento, engenharia, monitoramento ambiental e avaliação de riscos naturais. Contudo, para melhoria da precisão e eficiência nas aplicações das informações coletadas para cidades sustentáveis só pode ser realizado por meio da expansão da rede de estações GNSS.

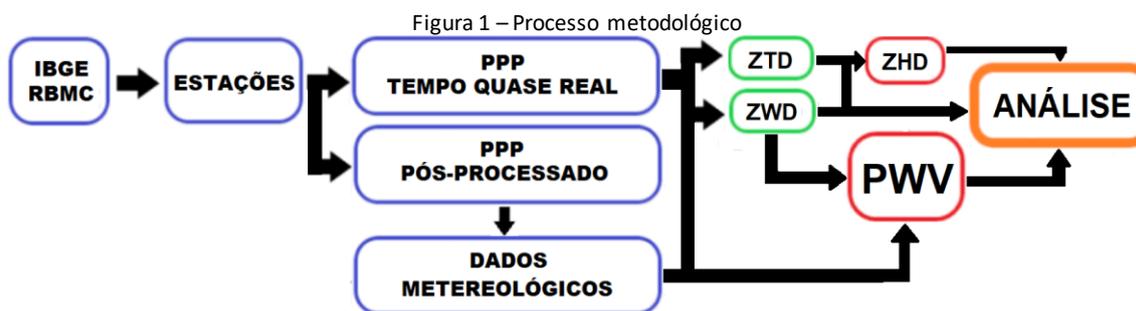
2 OBJETIVO

Diante do exposto, o trabalho visa investigar e analisar a melhoria da segurança nas

idades, por meio da utilização de estações GNSS para o monitoramento do Vapor de Água Precipitado (PWV), utilizando o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) em tempo quase real, para a compreensão da disponibilidade de umidade e sua relação com a precipitação em áreas urbanas, os benefícios para os recursos de previsão do tempo e auxílio na pesquisa de mudanças climáticas, visando mitigar os riscos associados a precipitações intensas, fornecer subsídios para o planejamento urbano, aprimorar as estratégias de gerenciamento de enchentes e promover o desenvolvimento urbano sustentável.

3 METODOLOGIA

A fim de demonstrar o potencial do uso do sistema GNSS no auxílio da estimativa e previsão de chuvas, foi utilizado a técnica PPP em tempo quase real e pós-processado para os cálculos dos PWVs, por meio de dados coletados de observações GNSS de cinco estações RBMC, para cada região do Brasil, localizado em cidades que sofrem consequências quando são atingidas por fortes chuvas e devido a disponibilidade de dados meteorológicos (INMET), no decorrer de 31/03/2023 (DOY 90). A Figura 1 ilustra o processo metodológico para estimativas do PWV e na Tabela 01 constam as estações e cidades utilizadas.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 1 – Informações das estações utilizadas

Região	Cidade	Nomes da estação	Latitude	Longitude
Norte	Manaus	AMUA	-3,09184	-60,03157
Nordeste	João Pessoa	PBJP	-7,13628	-34,87342
Sudeste	Belo Horizonte	MGJP	-19,86986	-43,96509
Sul	Florianópolis	IFSC	-27,59443	-48,54208
Centro-oeste	Cuiabá	CUIB	-15,55526	-56,06986

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

A atmosfera neutra é uma camada eletricamente neutra e sua subcamada mais próxima da superfície é conhecida como troposfera, onde possui em torno de 80% da massa total da atmosfera neutra e quase todo o vapor de água. O atraso do atraso troposférico total (ZTD) do caminho de transmissão do sinal é definido na Equação 1.

$$ZTD = m_{f_h} ZHD + m_{f_w} ZWD \quad (1)$$

Onde ZHD e ZWD são os atrasos hidrostáticos e úmidos em zênite, respectivamente; m_{fh} e m_{fw} são as funções de mapeamento hidrostático e úmido, respectivamente. Consultar Sapucci (2001), Sapucci (2005) e Gouveia (2019) para maiores detalhes referentes as estimativas dos atrasos zenitais e as funções de mapeamento. O PWV não é uma observação bruta, mas precisa ser derivado por certos métodos e modelos, podendo ser através ZWD conforme as seguintes Equações 2 e 3.

$$PVW = \Pi \cdot ZWD \quad (2) \quad \Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v [(K_3/T_m) + K'_2]} \quad (3)$$

Onde ρ_w é a densidade da água líquida ($999,97 \text{ kg/m}^3$), R_v é a constante de gás do vapor de água ($461,525 \text{ JK}^{-1}/\text{kg}^{-1}$), T_m denota a temperatura média ponderada da atmosfera, K'_2 ($22,1 \text{ K/mb}$) e K_3 ($3739 \text{ k}^2/\text{mb}$), são constantes determinadas experimentalmente. A T_m utilizada foi a desenvolvida por Sapucci (2005), que modelou funções para as 5 regiões do Brasil a partir dos dados de radiossondas. A função utilizada para o cálculo da T_m foi a Equação 4.

$$T_m = T_S \cdot a + P_S \cdot b + U_R \cdot c + d \quad (4)$$

Os termos T_S , P_S e U_R , são respectivamente, a pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa. Os valores dos coeficientes a, b, c e d, para as respectivas regiões brasileiras são exibidos na tabela 2.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes para as regiões brasileiras

Região	a	b	c	d
Norte	0,61390	0	0,020243	102,815
Nordeste	0,55843	0,012718	0	108,149
Sudeste	0,44330	0	-0,032011	155,717
Sul	0,36278	0	-0,050706	183,950
Centro-oeste	0,52286	0,004765	0	126,612

Fonte: Sapucci, 2005.

Para demonstrar como as cidades podem realizar o monitoramento e antecipar prováveis precipitações, foi realizado o PPP em tempo quase real das estações escolhidas, através da obtenção dos dados de observação GNSS por meio do protocolo NTRIP, com o software BKG Ntrip Client (BNC) versão 2.12.18, disponível através do link <<https://igs.bkg.bund.de/ntrip/bnc>>. Para ter acesso aos servidores Caster, responsável por distribuir os dados RCTM de correção, navegação e observáveis das estações da rede, foi necessário realizar o cadastro no link <<https://register.rtcn-ntrip.org/cgi-bin/registration.cgi>>. O cadastro necessita de confirmação, com um tempo de resposta média de um dia. Após validação, o usuário tem acesso aos servidores.

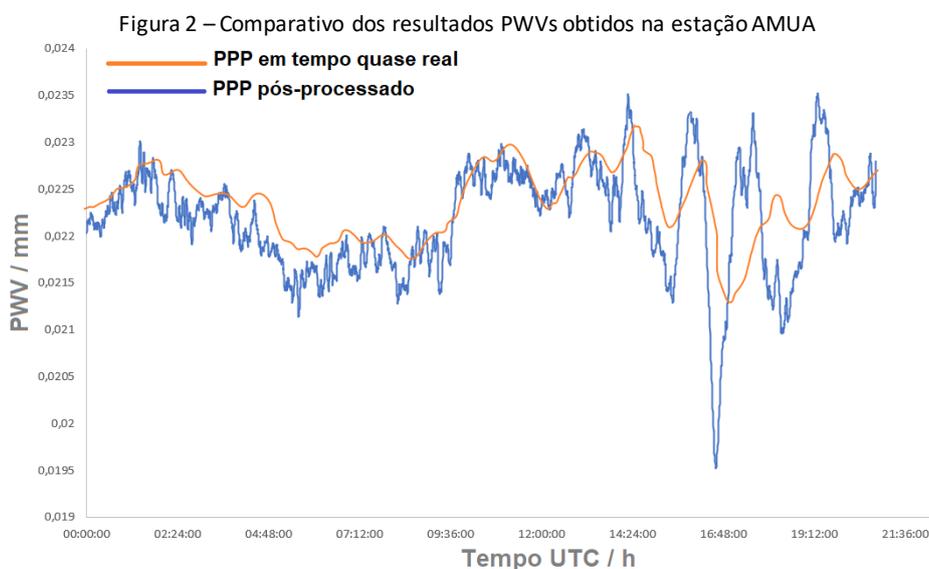
O Brasil, através do IBGE, também disponibiliza fluxo de dados e correções GNSS das estações pertencentes a RBMC, em tempo real (RBMC-IP), através do protocolo TCP/IP e identicamente utiliza o NTRIP via Internet. O cadastro para o acesso ao serviço RBMC-IP pode

ser realizado através do link < <https://www.ibge.gov.br/cadastro-dgc>>. O programa BNC realiza o cálculo dos atrasos troposféricos através dos modelos empíricos de Saastamoinen.

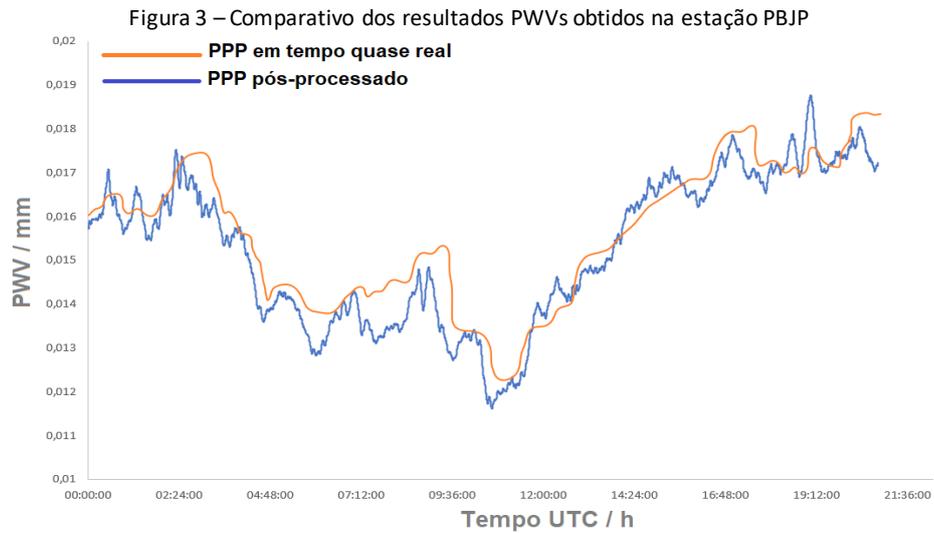
Os dados no modo pós-processado através do serviço online do IBGE foram utilizados como referência para avaliação dos resultados, que disponibiliza produtos troposférico a partir do PPP, sendo utilizado no trabalho os valores ZTD e ZWD. O cálculo do ZHD foi realizado conforme a Equação 1. Mais informações sobre os arquivos gerados, correções, modelo empírico da troposfera e dados disponíveis no processamento, consultar IBGE (2020). Os dados utilizados foram ZTD e ZWD e calculados o ZHD e PWV, segundo os dados meteorológicos INMET e T_m da Equação 4 e parâmetros na Tabela 2, conforme a região. A análise para avaliação da precisão foi realizada medidas estatísticas a partir dos erros entre valores observados e predições.

4 RESULTADOS

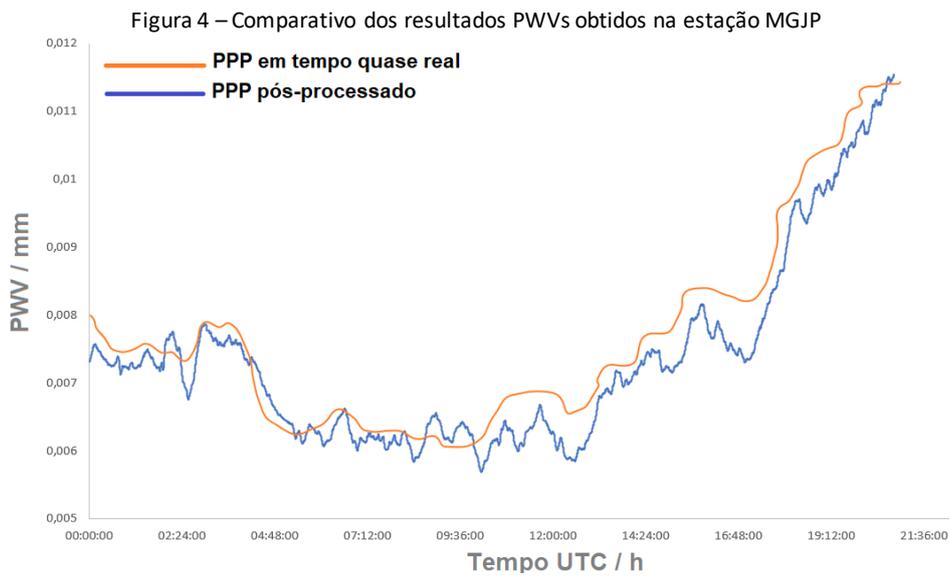
As Figuras 2 a 6 ilustram o comparativo do PWV calculado em tempo quase real e através do pós-processado dos dados por meio do serviço online do IBGE para cada estação definida.



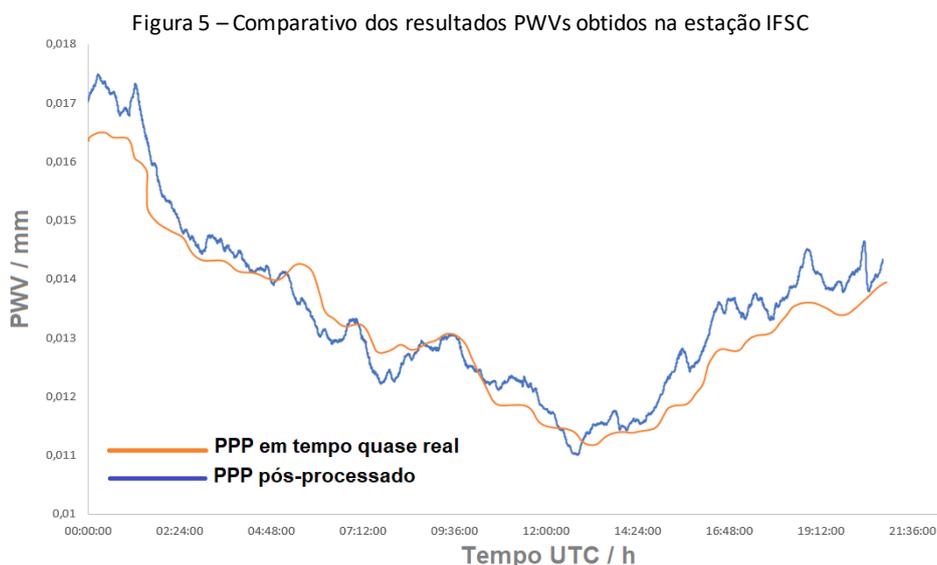
Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.



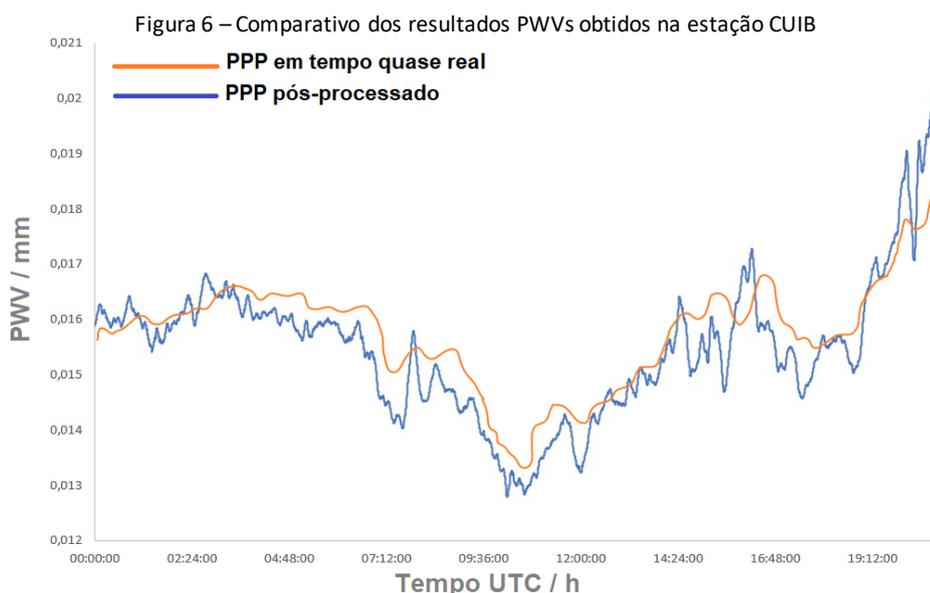
Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Ao avaliar as Figuras 2 a 6 é possível constatar a variabilidade dos padrões da umidade no território brasileiro e deduzir a influência relevante por fatores como latitude, proximidade da costa, ventos predominantes e presença de grandes rios e florestas, podendo haver variações locais dentro de cada região. Além disso, o clima do Brasil está sujeito a fenômenos de variabilidade climática natural que podem influenciar os níveis de umidade em maior escala. Os resultados, em uma análise geral, ilustram um maior detalhamento na variabilidade do teor de vapor d'água ao realizar o pós-processamento. Contudo, a solução em tempo quase real mantém-se próximo o comportamento geral do pós-processado.

Os resultados médios dos atrasos troposféricos entre os valores obtidos em tempo quase real e pós-processados e seus respectivos desvios padrão encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado médio e desvio padrão dos atrasos troposféricos

Estação	ZHD	ZWD	ZTD
AMUA	2,28643 ± 0,00112	0,35954 ± 0,03945	2,65637 ± 0,05476
PBJP	2,28750 ± 0,00122	0,24614 ± 0,04615	2,53912 ± 0,06725
MGJP	2,09973 ± 0,00117	0,12230 ± 0,04360	2,22306 ± 0,06643
IFSC	2,25747 ± 0,00108	0,22954 ± 0,03662	2,53500 ± 0,07009
CUIB	2,22889 ± 0,00099	0,25233 ± 0,02899	2,49865 ± 0,05723

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

De uma forma abrangente, com os resultados das medidas estatísticas apresentados na Tabela 3, ajuda a avaliar a aceitabilidade dos dados com base na quantidade de variabilidade no nível desejado de confiança, em torno da solução do PPP em tempo quase real, atinge resultados satisfatórios em comparação com os pós-processado oriundo do IBGE.

5 CONCLUSÃO

A visão de cidades e comunidades sustentáveis representa um caminho para um futuro mais próspero, equitativo e ambientalmente favorável. Ao adotar práticas sustentáveis em planejamento urbano e engajamento da comunidade, as cidades podem se tornar espaços habitáveis. As inundações representam uma ameaça multifacetada para as áreas urbanas, afetando a infraestrutura, a segurança humana, a economia, o meio ambiente e o bem-estar social. Reconhecendo a crescente frequência e gravidade desses eventos, as cidades devem priorizar medidas proativas para mitigar os riscos de inundação. Ao tomar medidas abrangentes, as cidades podem desenvolver resiliência e proteger melhor seus habitantes dos efeitos devastadores das inundações, garantindo um futuro mais seguro e sustentável. Em se tratando do Brasil, as inundações nas cidades são desafios complexos influenciados por fatores geográficos, mudanças no uso do solo, urbanização, disparidades socioeconômicas e impactos das mudanças climáticas. O monitoramento das chuvas nos centros urbanos é indispensável para construir cidades resilientes e se adaptar aos desafios de um clima em mudança. Dados de precipitação precisos e em tempo real permitem que as autoridades aprimorem as estratégias de gerenciamento de enchentes. O Brasil possui uma vasta e diversificada área geográfica, abrangendo diferentes zonas climáticas e ecossistemas. Portanto, é necessário um esforço colaborativo entre diferentes agências e instituições para garantir uma cobertura abrangente do monitoramento de chuvas em todo o país.

O trabalho ratifica a importância do uso dos sistemas GNSS para investigação da distribuição espacial do vapor de água e estudo climático, sendo usado a estimativa do PWV, para comprovar a eficiência do uso do GNSS em relação as outras técnicas, principalmente, a respeito do baixo custo e operar em todas as condições meteorológicas. O modo PPP em tempo quase real apresenta um grande potencial para o monitoramento do PWV e outros parâmetros relevantes. A Expansão da rede de estações GNSS em todos os centros urbanos, e em que as estações sejam equipadas com sensores meteorológicos, para monitoramento de PWV é um passo crucial para melhorar a previsão do tempo, estudos climáticos, aplicações hidrológicas e gerenciamento de desastres. A disponibilidade de uma densa rede de estações permite

medições PWV precisas e abrangentes. As áreas urbanas geralmente têm microclimas distintos em comparação com as regiões rurais vizinhas devido à presença de edifícios, estradas e outras infraestruturas. Esses microclimas urbanos podem influenciar os padrões climáticos locais e a precipitação. O monitoramento em tempo real do PWV ajuda a entender a variabilidade espacial do teor de vapor d'água em um ambiente urbano, fornecendo informações valiosas para previsões meteorológicas localizadas e estudos climáticos urbanos.

REFERÊNCIAS

- CASTRO, A.L. **Manual de Desastres: desastres**. Ministério da Integração Nacional, 2003.
- COHEN, S.; GUO, D. **The Sustainable City**. Columbia University Press, 2021. 352 p.
- GIRARDET, H. **Creating Sustainable Cities**. Green Books for the Schumacher Society, 1999. 77 p.
- GOUVEIA, T. A. F. Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul. 129f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2019.
- GUERRA, A. J. T.; VITTE, A. C. **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Bertrand Brasil, 2004. 282 p.
- IBGE. **IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS**. Editora IBGE, 2020. 65 p.
- JOHANSEN, B. **Climate Change: An Encyclopedia of Science, Society and Solutions**. ABC-CLIO, 2017. 1180 p.
- KELSEY, V.; RILEY, S.; MINSCHWANER, K. Atmospheric precipitable water vapor and its correlation with clear-sky infrared temperature observations. **Atmospheric Measurement Techniques**, n. 15, p. 1563–1576, 2022.
- LACONTE, P; GOSSOP, C. **Sustainable Cities: Assessing the Performance and Practice of Urban Environments**. I. B. Tauris & Company, 2016. 256 p.
- LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P. J.; MONTENBRUCK, O. **Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, 2017. 1292 p.
- LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS Satellite Surveying**. Wiley, 2015. 840 p.
- LI, R.; CHENG, C. T. Urban flooding: from urban to regional scale. **Journal of Hydrology**, n. 558, 11-21. 2018.
- MARQUES, H. A. PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS. 244f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. Editora UNESP, 2008. 476 p.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: Noções Básicas e Climas do Brasil**. Oficina de Textos, 2007. 208 p.
- REN, D.; WANG, Y.; WANG, G.; LIU, L. Rising trends of global precipitable water vapor and its correlation with flood frequency. **Geodesy and Geodynamics**, 2023.
- SANTOS, R. F. (org.) **Vulnerabilidade Ambiental**. MMA, 2007. 192 p.
- SAPUCCI, L. F. Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a geodésia e a meteorologia. 200f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.



SAPUCCI, L. F. Estimativa do vapor d’água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

TINGSANCHALI, T. Urban flooding: vulnerability, risks, and responses. **Sustainable Water Resources Management**, n. 3, p. 279-289, 2017.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. In: TUCCI, C.E.M; BERTONI, J.C. Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: ABRH/Rhama, 2003. Cap.2, pp.11-36.

WONG, T. H.; CHEN, Y. Understanding urban flood resilience: A review of progress and challenges. **Journal of Hydrology**, n. 575, 633-643. 2019.

ZIV, S. Z.; REUVENI, Y. Flash Floods Prediction Using Precipitable Water Vapor Derived from GPS Tropospheric Path Delays Over the Eastern Mediterranean. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, n. 60, p. 1-17, 2022.